

V—10 シリカフュームを用いたコンクリートの水中疲労強度の改善について

室蘭工業大学 学生員 渡辺 洋一
 室蘭工業大学 正 員 尾崎 詔
 室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之

1. はじめに

水中におけるコンクリートの200万回疲労強度が静的強度の30%程度まで低下する事は近年明らかにされているが、それに対する有効な手段はいまだ解明されていないのが現状である。このため水中及び湿潤な環境下において繰返し荷重を受ける海洋構造物や港湾構造物、雨水の浸入を受けるような道路橋鉄筋コンクリート床版などは非常に過酷な状況にあるといえる。このような水中及び湿潤環境下における疲労強度低下の原因としては、水のクサビ作用¹⁾、骨材界面での付着強度の低下などが考えられているが、直接観測の困難さによってそれらの疲労強度への影響は明確でない。しかし水セメント比を極めて小さくした超高強度密実コンクリートが水中で疲労強度の劣化をほとんど示さなかったという報告もあり²⁾、コンクリート内部の水分、特にマイクロクラック中の水分の存在が多分に疲労寿命に影響していることが推測できる。

著者らはこれまでに水中疲労強度改善の試みとして高炉セメントコンクリート、鋼繊維コンクリート、シリカフューム置換コンクリート、SECコンクリートなどを用いた疲労試験を行ってきたが³⁾、それらの完全片振り200万回疲労強度はそれぞれ33%、42%、39%、43%であり大気中での値55%前後に比較してまだ低い値と言わざるを得ない。そこで本研究ではシリカフューム置換コンクリートに着目し、文献3)で行った置換率10%を20%に変更して疲労試験を行い、シリカフュームの水中疲労強度の改善効果を調べるとともに置換率の違いによる200万回疲労強度の差を明らかにした。さらに、水中のpHの変化と供試体の歪を測定する事によって水中でのコンクリートの疲労性状についての考察を行った。

2. 実験材料及び配合

シリカフュームとはフェロシリコンメタルなどの製造時に副産物として収集される活性シリカ質粉末で、平均粒径 $0.1\mu\text{m}$ 程度の超微粒子である。セメントが水和する際に発生する水酸化カルシウムと反応する事によりカルシウムシリケート水和物(セメントゲル)を生成し微細な空隙を充填する効果がある。セメントの一部をシリカフュームで置換したコンクリートは通常のコンクリートに比較してブリージングが少なく強度の増加が著しい。また、水密性や化学抵抗性が向上するといった利点が認められ近年その使用が注目され始めている。

今回使用した材料はセメントに普通ポルトランドセメント、シリカフュームに日珪パウダーを用い置換率を20%とした。また、細骨材には海砂、粗骨材には碎石を用い、シリカフュームの使用に伴うスランプの減少を考慮してAE剤と減水剤を併用した。供試体の製作は表-1のような配合により2回に分けて行った。

表-1 示方配合

バッチ	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水(W)	セメント(C)	シリカフューム(Sf)	細骨材(S)	粗骨材(G)	AE剤(cc)	減水剤(g)
1	20	10.5	5.5	50	42	170	272	68	752	1034	135	1700
2	20	11.4	3.5	50	42	165	264	66	761	1048	99	1650

3. 実験供試体及び静的基準強度

コンクリートの練混ぜはまずセメントとシリカフュームおよび細骨材が均等になるように攪拌したあと粗骨材を加えて同様の作業を行い、その後水とAE剤、減水剤を加えて6分間練混ぜた。供試体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を計60本打設し、4~5時間後にベーストキャッピングを行い、24時間後に脱型した後20℃の恒温養生水槽内で原則として4カ月間水中養生を行った。静的基準強度は供試体を乾燥させる事

なく湿潤な状態で材令124日で測定し、1バッチ目が543kg/cm²、2バッチ目が535kg/cm²であった。また、歪の測定を行うために、歪ゲージを縦に2枚、横に2枚ずつそれぞれ対称になるように供試体の側面に接着した。その時に供試体を一時水槽から取り出し数時間大気中に放置したが、歪ゲージに防水加工を施した後水槽内に戻して最低24時間水を吸水させて疲労試験を開始した。

4. 疲労試験概要

疲労試験機は構造物疲労試験機（島津サーボバルサEHF-30型）を使用し、繰返し荷重の形式を正弦波、載荷速度を10Hzに固定した。疲労試験は繰返し荷重を供試体が破壊するまで連続に載荷し、破壊までの繰返し回数を測定した。荷重の上限応力比 S_1 は静的基準強度の60、55、50、45%を採用し、下限応力比 S_2 は3.5%前後で一定値とした。また、水中のpHを測定するために疲労水槽とは別にpH検出用水槽を設けてpHメータを常時設置しておき両水槽の水を循環させながら適当な繰返し回数時にpHの測定を行った。歪の測定に一定間隔で作動するデータレコーダを用いて応力-歪曲線を随時記録し、XYレコーダに出力して解析を行った。

5. 解析方法、P-N線図、S-N線図

各上限応力比ごとに供試体の疲労寿命Nに対する生存確率Pを $P = 1 - r / (n + 1)$ によって求め、それらが対数正規分布に従うと仮定してP-N線図上で直線回帰を行った(図-1)。このグラフより各上限応力比に対する生存確率50%(T=0)の点の疲労寿命を求めて直線回帰したものが図-2である。以上の結果を普通コンクリートの大気中、シリカフューム10%置換コンクリート(高炉セメント使用)の水中、普通コンクリートの水中と合わせて比較して見ると図-3及び表-2に示すように、上記のコンクリートに対する200万回疲労強度はそれぞれ57%、40%、33%であったのに対し本研究における水中シリカフューム20%置換コンクリート(普通ポルトランドセメント使用)は46%であった。いま普通コンクリートの大

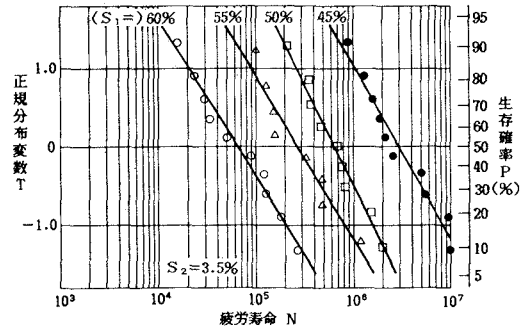


図-1 シリカフューム20%置換コンクリートのP-N線図

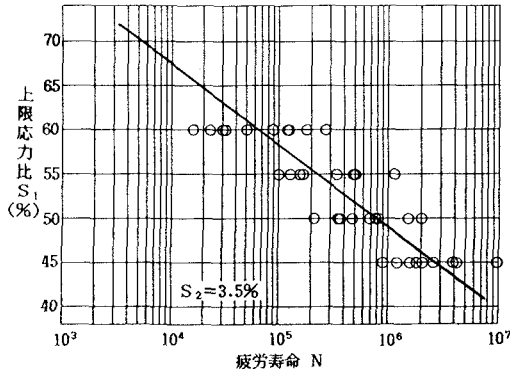


図-2 シリカフューム20%置換コンクリートのS-N線図

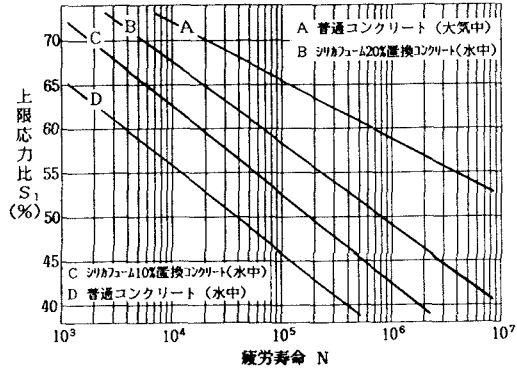


図-3 各種コンクリートのS-N線図

表-2 各種コンクリートのS-N線図の回帰式

	回帰式 (S-N LINE)	下限応力比 S_2 (%)	200万回疲労強度(%)
A 普通コンクリート (大気中)	$S_1 = 0.985 - 0.066 \log N^{4)}$	4	57
B シリカフューム20%置換コンクリート (水中)	$S_1 = 1.046 - 0.093 \log N$	3.5	46
C シリカフューム10%置換コンクリート (水中)	$S_1 = 1.028 - 0.100 \log N^{3)}$	3	40
D 普通コンクリート (水中)	$S_1 = 0.960 - 0.100 \log N^{4)}$	4	33

気中と水中での200万回疲労強度の差 $57-33=24\%$ を基準にして考えると本研究におけるシリカフューム20%置換コンクリートの場合 $57-46=11\%$ となり普通コンクリートの気中と比較して200万回疲労強度の差が半分以下になっている。このことから普通コンクリートの水中における疲労強度低下分の5割以上を本研究のシリカフューム20%置換コンクリートが改善したといえる。また、シリカフューム10%置換コンクリートと比較しても疲労寿命が大きくなっており、シリカフュームの効果がより大きいことが示された。

6. pHに対する考察

図-4、5、6にそれぞれシリカフューム20%置換コンクリート、シリカフューム10%置換コンクリート、普通コンクリートの疲労繰返し回数Nに対するpHの変化を示した。シリカフュームを10%または20%置換したコンクリートは破壊までの水酸化カルシウム溶出に伴うpHの変化が普通コンクリートに比較して少なくなっている。これにはシリカフュームのポゾラン反応による水酸化カルシウム生成量の減少が考えられ、同時にこの反応による空隙充填効果によってコンクリートの密実度が増し、疲労強度の増大につながったと考えられる。

上記の3種類のグラフに共通して見られる特性として、破壊が近づくにつれてグラフの勾配が急に大きくなる点の存在が挙げられる。pHのアルカリ性への変化と供試体の損傷度とは密接な関係があると思われるがこの点は各上限応力比に関係なく全疲労寿命の70%付近で起こっている。この点は繰返し荷重の作用によって微細なひび割れが進展する過程で、ひび割れ内に水が浸入しその水のクサビ作用によってひび割れの拡大が急速に促進される点であると考えられる。加えて、疲労試験の進行に伴い供試体内部からコロイド状の水和物の流出が観測され、pHの上昇と共に疲労水槽内の水が白濁してくるのが認められる。これらの現象からポンピング作用と呼ばれる供試体内外での水の出入りが予測され水のクサビ作用を引き起こす要因になっていると思われる。

7. 体積歪に対する考察

図-6、7、8にそれぞれ普通コンクリート大気中、普通コンクリート水中、シリカフューム20%置換コンクリート水中における体積歪と繰返し回数Nとの関係を示す。普通コンクリートにおける大気中と水中での体積歪の変化には明確な相違が見られ、大気中では体積歪がマイナス（収縮）側から緩やかにプラス（膨張）側に移行し、体積歪が0を過ぎても瞬時に破壊には至らない。これに対して水中においては繰返し回数の初期ではほぼ一定値を保っているが体積歪が膨張側へ移行を始めると急激に体積歪が増加し急速に破壊が起こっている。特に体積歪0を過ぎる付近ではグラフの立ち上がりがほぼ垂直になっている。同様な傾

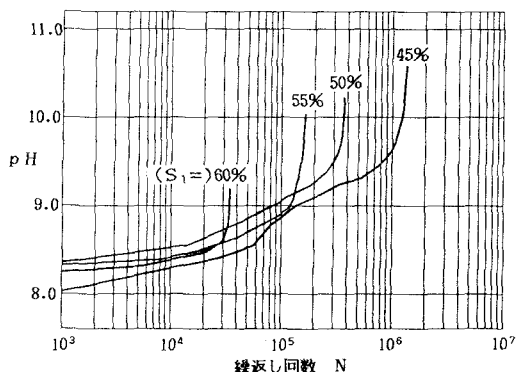


図-4 シリカフューム20%置換コンクリートのpHの変化

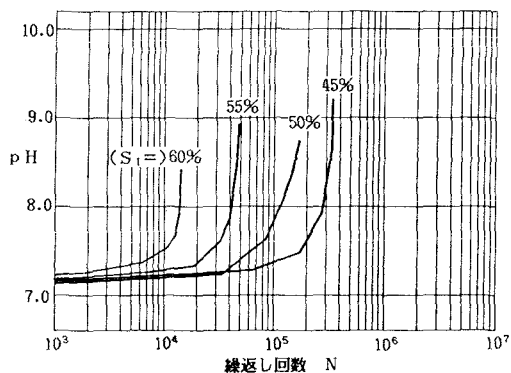


図-5 シリカフューム10%置換コンクリートのpHの変化

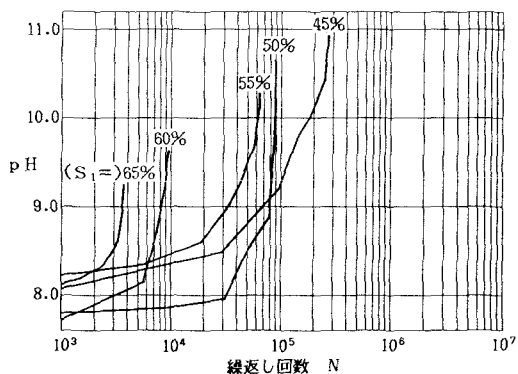


図-6 普通コンクリートのpHの変化

向が本研究におけるシリカフューム20%置換コンクリートにおいても見られ疲労寿命が伸びたにもかかわらず普通コンクリートとほぼ同じ性状を示していることがわかる。体積歪の急激な増大は横歪の急増を示すもので、横歪の増大は縦に走るひび割れの拡大及び増加を示している。また、グラフの急になる点は供試体によって多少の散らばりがあるがpHの場合とほぼ一致する事などから、ひび割れの進展に付随する水のくさび作用によってひび割れの拡大が急速に促進され、体積歪の急増につながっていると思われる。これらはコンクリートの中における疲労性状の本質的な特性と考えられる。

8. まとめ

[1]各種コンクリートの完全片振りに換算した200万回疲労強度は、普通コンクリートの大気中で55%($k=14.0$)、シリカフューム20%置換コンクリートの水中で44%($k=11.3$)、シリカフューム10%置換コンクリートの水中で39%($k=10.3$)、普通コンクリートの水中で30%($k=9.0$)となりシリカフュームの効果と置換率の違いによる差が定量化された。なお、参考までに土木学会コンクリート標準示方書における定数 k の値を()内に示した。

[2]pHの測定結果から推定した水酸化カルシウムの溶出量は普通コンクリートに比較してシリカフュームを混入したコンクリートで1/5から1/10に減少している。この事からシリカフュームのポゾラン反応による水酸化カルシウム生成量の減少が推定できる。

[3]水中における疲労強度低下の原因は、初期繰返し载荷時における骨材界面の付着力の低下によるひび割れの早期進展と、水のくさび作用によるひび割れの急速な拡大によるものと思われる。以上はpHや体積歪の挙動によって裏付けられており、密実なコンクリートを使用する事で水の影響を少なくし疲労強度の増進を図ることが出来る。

参 考 文 献

- 1) Knut Waagaard : Fatigue Strength Evaluation of Offshore Concrete Structure, Fatigue of Concrete Structures, ACI, SP-75-18, pp.373-397, 1982
- 2) 六車、渡辺、紺谷、佐藤、小西：水中におけるコンクリート系部材の低サイクル疲労、セメント技術年報37、昭和58年
- 3) 鈴木、尾崎：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度の改善について、土木学会第40回年次学術講演会、昭和60年9月
- 4) 尾崎、志村：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度、土木学会第35回年次学術講演会、昭和55年9月

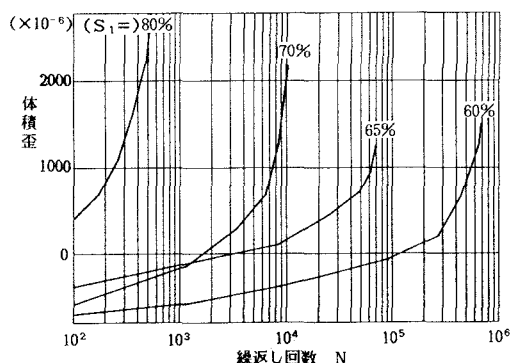


図-7 普通コンクリートの大気中での体積歪の変化

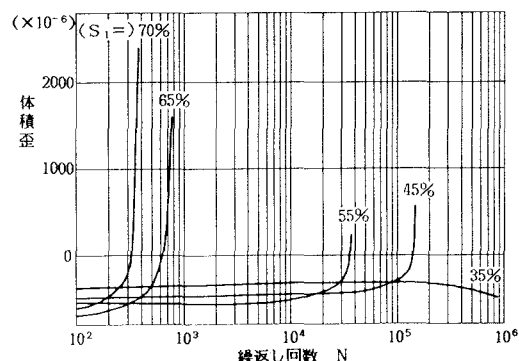


図-8 普通コンクリートの水中での体積歪の変化

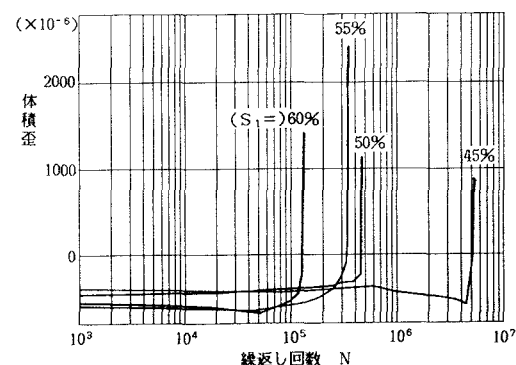


図-9 シリカフューム20%置換コンクリートの水中での体積歪の変化